نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 30، شماره 1، فروردین – اردیبهشت 1395، ص. 98-88

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 1, Mar.-Apr. 2016, p. 88-98

تخصیص بهینه بار آلودگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه و تحلیل تصمیم چند معیاره

لیلا صابری[1]- محمد حسین نیک‌سخن[2*]- امین سارنگ[3]

تاریخ دریافت: 1393/05/05
تاریخ پذیرش: 1394/01/17

چکیده

با توجه به اهمیت رودخانه‌ها و حفظ کیفیت آب، مدیریت کیفیت آب و ارائه راهکارهای کاهش آلودگی مورد توجه قرار دارد. هدف از برنامه‌ریزی و مدیریت کیفیت سامانه‌های رودخانه‌ای، تدوین و اجرای مجموعه‌ای هماهنگ از راهکارها و سیاست‌های کاهش یا تخصیص بار آلودگی ورودی به رودخانه است، به طوری که کیفیت آب با میزان قابل قبولی با استانداردهای زیست‌محیطی منطبق گردد. در این‌گونه مسائل، تصمیم‌گیرندگان و تأثیرپذیرندگان متعددی با مطلوبیت‌های متفاوت وجود دارند. برای مطالعه رفتارهای رقابتی تصمیم‌گیرندگان در چنین وضعیت‌هایی، از ابزاری ریاضی با نام نظریه بازی‌ها، استفاده می‌گردد. در این تحقیق، ابتدا اهداف تصمیم‌گیرندگان که شامل حداقل‌سازی مقدار تخطی از استاندارد کیفیت آب و مجموع هزینه‌های تصفیه و جریمه قابل پرداخت توسط تخلیه کنندگان می‌باشند، مشخص می‌گردد. سپس بر اساس مطلوبیت تصمیم‌گیرندگان، استراتژی‌هایی بر اساس توافق ایشان بر روی منحنی تعامل بین اهداف بدست آمده از روش بهینه‌سازی چند هدفه بر پایه الگوریتم حرکت ذرات، تعیین می‌شود. بدین ترتیب سیاست‌های اولیه مدیریت کیفیت آب به گونه‌ای تدوین می‌شوند که مطلوبیت تا حد امکان تامین گردد. سپس با استفاده از تئوری بازی‌های غیر همکارانه، از بین سناریوهای مطرح شده، بهترین آن‌ها با توجه به معیارهای در نظر گرفته شده مشخص می‌شود. در این مدل از روش چانه‌زنی نش برای حل اختلاف استفاده شده است. اجرای روش پیشنهادی در رودخانه سفیدرود که شرایط کنونی درصد تصفیه تمامی منابع آلاینده برابر با صفر و BOD در نقطه کنترل 26/59 میلی‌گرم در لیتر است، بهینه‌ترین جواب بدست آمده از تئوری بازی‌ها مقدار BOD را تا 6/16 میلی‌گرم در لیتر کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه سازی حرکت ذرات، چانه‌زنی نش، سفیدرود، کیفیت آب

مقدمه

کاربردهای مدل‌های رفع اختلاف در برنامه‌ریزی و مدیریت کمی و کیفی منابع آب محدود می‌باشد و تنها در سال‌های اخیر در این زمینه فعالیت‌های مختصری انجام شده است. از مهم‌ترین مطالعات در این زمینه می‌توان به تحقیقات انجام شده زیر اشاره کرد: نش (18) یک تئوری چانه‌زنی با مبانی علمی قوی را در علم اقتصاد ارائه داد. کاربردهای این تئوری در علم اقتصاد بسیار گسترده بوده است به طوری که جایزه نوبل اقتصاد را برای این ریاضی‌دان به ارمغان آورد. تئوری نش با داشتن یک مبنای علمی مناسب می‌تواند در رفع اختلافات در بهره‌برداری کمی و کیفی از سیستم‌های منابع آب نیز مورد استفاده قرار گیرد.

کراچیان و کارآموز (13 و 14) برای نخستین بار امید ریاضی تابع ضربی نش[4] را به عنوان تابع هدف مدل بهره‌برداری کمی و کیفی از سیستم‌های منابع آب مورد استفاده قرار داده‌اند. گنجی و همکاران (9) بر اساس اصول تئوری بازی‌ها[5]، از مدل پویای غیر قطعی بازی نش با اطلاعات کامل (SDNG)[6] برای حل اختلاف بین مصرف‌کنندگان آب استفاده کردند.

نیک‌سخن و همکاران (19) با استفاده از تئوری چانه زنی یونگ، مدلی را برای تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی در سیستم رودخانه ای توسعه دادند و سیاست‌های بهینه مدیریت کیفیت آب رودخانه را به

1-کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست- منابع آب، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران
2 و 3-استادیاران مهندسی آب (دکتری عمران)، عضو هیأت علمی دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران
(*- نویسنده مسئول: (Email: niksokhan@ut.ac.ir

4-Nash product
5-Game Theory
6-Stochastic Dynamic Nash Game

شکلی که مطلوبیت هریک از طرف‌های درگیر تا حد امکان به‌صورت عادلانه تأمین گردد تدوین نمودند. مدنی (16) به کمک مفاهیم بازی‌های غیر همکارانه قابلیت‌های تئوری بازی‌ها را در مدیریت منابع آب و حل اختلاف بررسی کرد. ابریشمچی و دانش یزدی (1) به بررسی تئوری بازی‌ها در حل مناقشات آبی حوضه دریاچه ارومیه بین سه بازیکن آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان پرداختند.

بهره‌برداری از منابع آب و مدیریت کیفیت آب در سامانه رودخانه‌ای در دهه‌های گذشته مورد توجه محققین و سیاست‌گذاران بخش آب قرار داشته است. یکی از موارد مهم در بحث بهره‌برداری کمی و کیفی از منابع آب موجود، رفع اختلاف بین تصمیم‌گیرندگان و تأثیرپذیرندگان این سیستم‌ها می‌باشد. معمولاً در بهره‌برداری‌های کمی-کیفی از منابع آب، بخش‌ها و سازمان‌های مختلفی مانند وزارت نیرو، سازمان حفاظت محیط‌زیست، وزارت جهاد کشاورزی و بخش‌های خصوصی دیگر دخالت دارند و اهداف و مطلوبیت‌های آن‌ها در بسیاری از مواقع در تضاد با یکدیگر می‌باشند. به‌عنوان مثال برخی از سازمان‌ها صرفاً درصدد بهره‌برداری از منابع آب در جهت افزایش نرخ تولید بوده و توجهی به عوارض بهره‌برداری‌های بی‌رویه خود نمی‌نمایند و در جهت کاهش هزینه‌های خود، مبادرت به کنترل کیفیت و تصفیه پساب خروجی خود نمی‌نمایند. درصورتی‌که سازمان حفاظت محیط‌زیست تنها مسئولیت تلاش در جهت حفظ سلامت منابع آب از حیث کمی و کیفی و نظارت بر عملکرد سازمان‌های این چنینی را دارد و در عین حال، هر کدام از قدرت نسبی متفاوتی در تصمیم‌گیری برخوردارند. دیدگاه‌های مختلف طرف‌های درگیر و ذینفعان هر کدام به نوبه خود حائز اهمیت می‌باشد. امروزه استفاده از مدل‌های رفع اختلاف و تئوری بازی‌ها که امکان در نظر گرفتن نظرات تصمیم‌گیرندگان مختلف در یک سیستم و نیز تأمین حداقل اهداف هر یک از ذینفعان را فراهم می‌سازند، به تدریج جایگزین مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره شده‌اند. در این تحقیق ساختارهای جدیدی برای مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها ارائه می‌شود که در آن‌ها، با استفاده از مدل رفع اختلاف و تئوری بازی‌های غیرهمکارانه در مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها و با فرض عدم همکاری کامل بین تصمیم‌گیرندگان، بهترین راه حل را که ضمن حفظ کیفیت آب در حد مطلوب، حداقل منافع ذینفعان نیز تامین می‌شود، پیشنهاد می‌شود.

مواد و روش‌ها

ساختار مدل پیشنهادی

مدل تلفیقی رفع اختلاف و تخصیص بار آلودگی که در این تحقیق برای حل مسائل مدیریت کیفی رودخانه‌ها پیشنهاد شده است از چند قسمت تشکیل می‌شود. در ابتدا پس از جمع‌آوری اطلاعات هیدرولیکی و کیفی رودخانه و فاضلاب‌های ورودی به رودخانه و صحت سنجی این اطلاعات، ازآن‌ها برای شبیه‌سازی شرایط کیفی رودخانه استفاده می‌شود. این مدل شبیه‌سازی کیفی با مدل الگوریتم حرکت ذرات(MOPSO)[1] تلفیق می‌شود و با تعیین اهداف و مطلوبیت‌های گروه‌های تصمیم‌گیرندگان و ذینفعان، بهینه‌ترین پاسخ‌ها با در نظر گرفتن مطلوبیت ذینفعان به دست می‌آید. اهداف در نظر گرفته شده در این تحقیق حداقل کردن مجموع هزینه تصفیه و جریمه تخلیه‌کنندگان و حداقل کردن مقدار تخطی BOD[2] از استاندارد می‌باشند. در مرحله بعد، ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری چندمعیاره تشکیل می‌شود. با ایجاد ماتریس انتقال، مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره به تئوری بازی‌ها تبدیل می‌گردد. درنهایت به کمک تعریف تعادلی نش، درصد تصفیه بهینه با توجه به معیار کاهش هزینه تصفیه و مقدار تخطی متناظر آن محاسبه و درصد تصفیه مربوطبه هر تخلیه کننده مشخص می‌شود. ساختار کلی انجام کار در شکل 1 ارائه شده است.

منطقه مورد مطالعه

عملکرد مدل پیشنهادی بر روی رودخانه سفیدرود واقع در حوضه آبریز سفیدرود بزرگ در استان گیلان آزموده شده است. در این تحقیق بازه بعد از سد سفیدرود تا دریای خزر به طول 114/95 کیلومتر مورد بررسی قرار گرفته است. در منطقه مطالعاتی، تعداد 15 بار نقطه‌ای که آلاینده را به این رودخانه تخلیه می‌کنند وجود دارد که منطبق بر نه بازه هستند (تخلیه کننده‌های نزدیک بهم، در یک بازه و محل در نظر گرفته شده‌اند). محدوده حوضه آبریز سفیدرود در شکل 2 نشان داده شده است. اطلاعات کمی و کیفی بازه‌های رودخانه در جدول 1 آمده است (6 و20). با بررسی اطلاعات مربوط به نمونه‌برداری در دوره‌های مختلف و مقایسه نتایج کمی و کیفی رودخانه، شهریور ماه 87 به‌عنوان بحرانی‌ترین زمان از لحاظ کیفیت آب برای رودخانه تشخیص داده شد و از اطلاعات این ماه برای مدلسازی رودخانه استفاده شده است.

استاندارد کیفی مورد استفاده

در تعیین مقدار تخطی از استاندارد، نقطه کنترل محل ورود رودخانه سفیدرود به دریای خزر، مصب، درنظر گرفته شده است. حداکثر میزان BOD مجاز در مصب برابر 5 میلی‌گرم در لیتر فرض شده است (6).

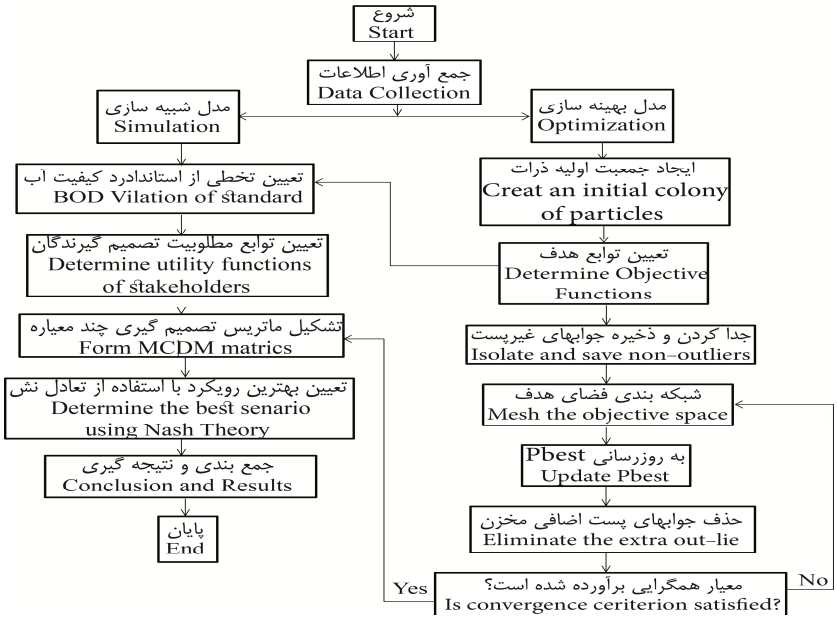
1-Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithem
2-Biological Oxygen Deman

مدل شبیه‌سازی کیفیت آب

برای شبیه‌سازی مدل کیفی از معادلات استریتر-فلپس استفاده‌شده است. مدل شبیه‌ساز کیفی بکار رفته، واکنش‌های بیوشیمیایی و نحوه انتقال BOD و DO را در طول رودخانه مدل می‌کند. معادلات استریتر فلپس برای بار نقطه‌ای در این تحقیق بکار رفته است. بر اساس معادلات فوق روند تغییرات BOD و DO در یک بازه به طول x (که در ابتدای آن بار نقطه‌ای وارد شده است و مقدار BOD اولیه و DO یا اکسیژن محلول اولیه آن مشخص باشد) به صورت روابط 1 و 2 خواهد بود (8).

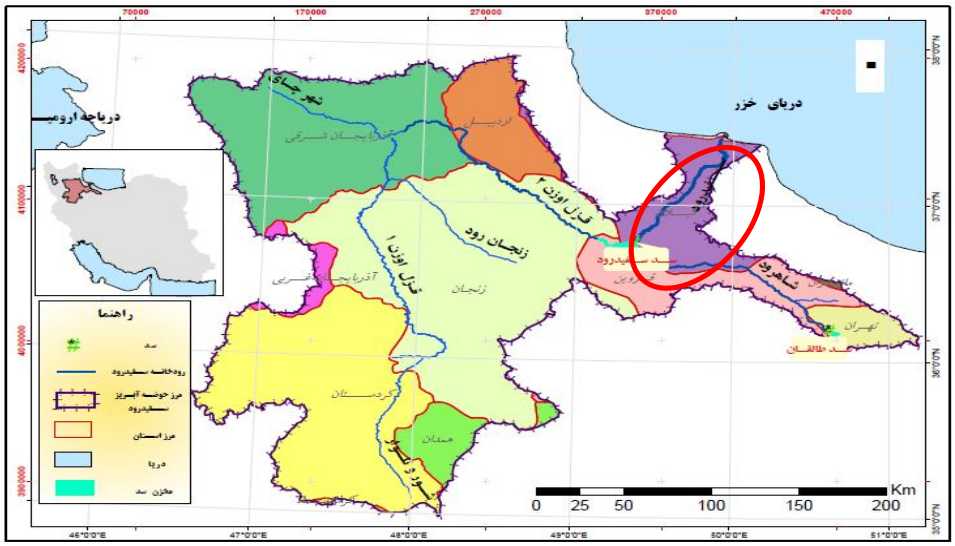
$$BOD(x) = BOD_0 \times e^{-\frac{k_r}{U}x} \quad (1)$$

$$O_s - O(x) = (O_s - O_0)e^{\frac{k_a}{U}x} + \frac{k_d BOD_0}{k_a - k_r}(e^{\frac{k_r}{U}x} - e^{\frac{k_a}{U}x}) \quad (2)$$



شکل 1- ساختار کلی روش انجام کار

Figure 1- The overall structure of the research



شکل 2-موقعیت محدوده مطالعاتی رودخانه سفیدرود (6)

Figure 2- The location of the Sefidrud studied area (6)

جدول 1- مقادیر و کیفیت بازه‌های رودخانه در شهریور ماه 1387

Table 1- Quantity and Quality of the features of the river in September 2008

شماره بازه Reach	طول (Km) Length	دمای آب (^oC) Water Temperature	دبی در اول بازه (m^3/s) Discharege	غلظت اکسیژن محلول ابتدای بازه (mg/L) DO Concentration	BOD ابتدای بازه (mg/L) BOD Concentration
1	10.5	18	106	4.34	43
2	12.4	16	130	3.92	53
3	11.3	20	116	5.09	62
4	9.7	19	115	3.36	55
5	15.5	18	118	4.41	47
6	17.8	19	233	3.98	42
7	14.9	20	127	4.01	52
8	17.6	21	156	3.93	98
9	5.2	21	121	3.85	34

در روابط فوق BOD(x)مقدار آلاینده در فاصله x از محل تخلیه، BOD_0 مقدار اولیه آلاینده در ابتدای شاخه، U مقدار سرعت جریان در بازه مربوطه، k_r مقدار کل ضریب کاهش اکسیژن،O_s اکسیژن اشباع، O(x) مقدار اکسیژن محلول در فاصله x از محلتخلیه، O_0 مقدار اکسیژن محلول در ابتدای شاخه، k_a ضریب هوادهی و k_d مقدار ضریب کاهش اکسیژن است. برای محاسبه ضرایب زوال BOD و ضریب هوادهی، ابتدا مقادیر اولیه ضرایب با استفاده از مدلسازی رودخانه در نرم‌افزارهای GIS و HEC-RASبه دست آمده و سپس با استفاده از مقادیر مشاهداتی BOD و DO در طول مسیر رودخانه، فرایند کالیبراسیون انجام شد. مقادیرکالیبره شده نهایی مربوط به ضرایب زوال BOD و ضرایب هوادهی در بازه‌های مختلف در جدول 2 نشانداده شده است. مقدار اکسیژن محلول اشباع در این تحقیق برابر 9 میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

جدول 2- مقدار پارامترهای کالیبره شده نهایی مورد استفاده در شبیه‌سازی کیفی رودخانه

Table 2- Final calibrated parameters used in water quality simulation

شماره بازه Reach	ضریب زوال BOD در دمای 20 °C (روز/1) Decaycoefficient in 20 °C (1/day)	ضریب هوادهی رودخانه در دمای20 °C (روز/1) Aeration coefficient in 20 °C (1/day)
1	0.09	0.45
2	0.05	0.35
3	0.1	0.38
4	0.1	0.41
5	0.1	0.35
6	0.08	0.35
7	0.1	0.35
8	0.1	0.35
9	0.1	0.4

الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه MOPSO

در این مطالعه، از الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO استفاده شده است که فرایند جستجو را با تولید مجموعه‌های تصادفیبه تعداد اهداف، با مشخصات یکسان (تعداد ذره و ابعاد) و توزیع یکنواخت آغاز نمود. این مجموعه با توجه به سرعت‌های هر ذره و مجموعه به سمت نقطه بهینه حرکت می‌کند. به این ترتیب بردار حرکت ذره در هر تکرار تحت تاثیر بهترین موقعیتی که ذره تا کنون به آن رسیده است و بهترین موقعیتی که بهترین عضو مجموعه تا کنون به آن رسیده است، می‌باشد (8).

توابع هدف

توابع هدف در نظر گرفته شده برای مسأله رفع اختلاف حاضر در مدیریت کیفی رودخانه مطابق رابطه (3) می‌باشد:

$$\begin{cases} min \sum_{i=1}^{n} C_i T_i \\ min\, BOD_c \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه فوق T_i میزان درصد تصفیه تخلیه‌کننده i، C_i تابع محاسبه هزینه و n تعداد تخلیه‌کنندگان در طول بازه در نظر گرفته شده درورودخانه می‌باشد و هزینه تصفیه تخلیه‌کننده می‌باشد. در واقع یکی از اهداف، کاهش مجموع هزینه تصفیه منابع آلاینده می‌باشد. در این مسأله درصد تصفیه به صورت حذف درصدی از میزان BOD فاضلاب ورودی به رودخانه در نظر گرفته شده است. همچنین، هدف بعدی مینیمم سازی مقدار BOD در نقطه کنترل واقع در مصب رودخانه (BOD_c) می‌باشد.

تخمین توابع هزینه

تابع هزینه یکی از توابع مطلوبیت مورد نظر در این پژوهش می‌باشد که لازم است مطابق موارد اجرایی در سطح کشور و سطح بین المللیبه همراه مطالعات نظری و گزارش های موجود بافرضیاتی تعیی نگردد. بدین منظور، ابتدا هزینه های ساخت و محوطه سازی تصفیه خانه های فاضلاب برای یک دوره طرح 30 تا 35 سال در نظرگرفته می‌شوند. سپس هزینه‌های حاشیه‌ای ساخت متوسط سالانه (باتقسیم هزینه‌ها بر دوره 30 ساله) مشخص شده و با توجه به عمر تجهیزات و لوازم مورد نیاز، درسه بازه زمانی ده ساله، بیست ساله و سی ساله، هزینه‌های بهره‌برداری با لحاظ تورم به‌طور متوسط معادل 5 درصد، 10 درصد و 15 درصد به آن اضافه و صحت‌سنجی شده است (22 و 21). در فرمول شماره (4) نحوه محاسبه هزینه حاشیه‌ای ساخت و بهره‌برداری واحدهای تصفیه نشان داده شده است (11).

$$\frac{C+(c\times(1.05)^{10})+(c\times(1.1)^{10})+(c\times(1.15)^{10})}{30} \quad (4)$$

C: هزینه ساخت در 30 سال

c: هزینه‌های حاشیه‌ای ساخت متوسط سالانه

بدین ترتیب تابع هزینه تصفیه برای تخلیه‌کنندگان فاضلاب صنعتی طبق رابطه 5 و برای تخلیه‌کنندگان فاضلاب شهری طبق رابطه 6 به دست آمد. در روابط زیر، پارامتر T عبارتست از درصد حذف مواد آلی (3).

$$Cost(\frac{\$}{m^3.year}) = 0.5T^3 + 0.73T^2 + 0.09T + 0.02 \quad (5)$$

$$Cost(\frac{\$}{m^3.year}) = 0.434T^2 + 0.228T + 0.029 \quad (6)$$

تخمین توابع جریمه

تابع جریمه برای حالتی که مقدارBOD در پایین دست رودخانه از مقدار BOD مجاز بیشتر باشد، تعریف می‌شود. بر اساس روش هزینه‌های جایگزین، مقدار جریمه برابر با هزینه اضافی برای تصفیه بیشتر فاضلاب تاجایی که مقدار BOD در نقطه کنترل از مقدار BOD مجازت خطی نکند، در نظر گرفته می‌شود. پنج ترکیب تصفیه متفاوت فرض شده و با استفاده از آن‌ها نمودار تابع جریمه بر حسب میزان تخطی BOD در نقطه کنترلی ترسیم می گردد (7). در تخمین توابع جریمه فرض شده‌است که مقدار جریمه تخطی از استاندارد در نقطه کنترل کیفیت آبدر پایین دست تخلیه کننده‌ها، به‌طور یکسان بین آن‌ها تقسیم می‌شود. رابطه (7) تابع جریمه تخلیه‌کنندگان بار آلودگی بر حسب مقدار تخطی BOD از استاندارد بر اساس شرایط کمی و کیفی موجود در جریان بالادست رودخانه می‌باشد.

(7)

$$Cost(\frac{\$}{Year}) = 983.27(BOD - BOD_{std})^2 + 37313(BOD - BOD_{std})$$

تصمیم‌گیری چند معیاره

در خصوص مسائل چند تصمیم گیرنده و چند معیار، اکثر تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره اهداف تصمیم‌گیرندگان مختلف را جمع‌بندی می‌کنند و به یک هدف ترکیبی دست می‌یابند به نحوی که مسئله تصمیم چند منظوره را در ابتدا به مسئله تک منظوره تبدیل می‌نمایند. سپس یک تصمیم‌گیرنده کاملاً آگاه و بسیار قوی تصمیم نهایی را اتخاذ می‌نماید تا به نفع همه گروه‌های ذینفع (بر حسب معیار مد نظر) باشد. لذا با توجه به منطق فوق، قضاوت نهایی تحمیل می‌گردد و از این حیث اکثر تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ضابطه‌ای (تجویزی) هستند. روش‌های ضابطه‌ای تصمیم‌گیری چند معیاره در حال حاضر بر فرض همکاری کامل میان تصمیم‌گیرندگان و جستجو به دنبال راه حل‌های نامغلوب (بهینه‌سازی پارتو) استوار هستند. لذا این روشها در جایی مناسب هستند که یک تصمیم‌گیرنده تصمیم نهایی را می‌گیرد. مسئله یک تصمیم‌گیرنده و چند معیار با m راه حل (استراتژی) و n معیار به شکل مشخصه رابطه (8) تعریف می‌گردد:

$$MCDM_{card}=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ . & . & \dots & . \\ . & . & \dots & . \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix}_{m\times n} \quad (8)$$

که در آن P_{ij} عملکرد (منفعت)i امین راه حل با توجه به معیارj است و i = 1,2,….,m وj = 1,2,….,n.

همین ماتریس را می‌توان برای مسئله چند تصمیم‌گیرنده و چند معیار با k تصمیم‌گیرنده به کاربرد به طوری که هر تصمیم‌گیرنده تنها داراییک معیار (n=k) باشد. در چنین مسئله‌ای P_{ij} (نفع تصمیم‌گیرندهj از راه حل i) را می‌توان با U_{ij} جایگزینکرد. لذابرای i = 1,2,….,m وj =1,2,….,k بدست می‌آید:

$$MCDM_{card}=\begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & . & . & U_{1k} \\ U_{21} & U_{22} & . & . & U_{2k} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ U_{m1} & U_{m2} & . & . & U_{mk} \end{bmatrix}_{m\times k} \quad (9)$$

در حالت کلی برای مسئله چند تصمیم‌گیرنده و چند معیار با m راه حل و k تصمیم‌گیرنده، اگر هر تصمیم گیرنده دارای n معیار باشد، ماتریس تحلیل تصمیم به بسط داده می‌شود:

$$MCDM_{card}=\begin{bmatrix} P_{111}P_{121}\dots P_{1n1}P_{112}P_{122}\dots P_{1n2}\dots P_{11k}P_{12k}\dots P_{1nk} \\ P_{211}P_{221}\dots P_{2n1}P_{212}P_{222}\dots P_{2n2}\dots P_{21k}P_{22k}\dots P_{2nk} \\ . \ . \ \dots \ . \ . \ . \ \dots \ . \ \dots \ . \ . \ \dots \ . \\ . \ . \ \dots \ . \ . \ . \ \dots \ . \ \dots \ . \ . \ \dots \ . \\ . \ . \ \dots \ . \ . \ . \ \dots \ . \ \dots \ . \ . \ \dots \ . \\ P_{m11}P_{m21}\dots P_{mn1}P_{m11}P_{m21}\dots P_{mn1}\dots P_{m1k}P_{m2k}\dots P_{mnk} \end{bmatrix}_{ml} \quad (10)$$

در این جا P_{ijq} عملکرد راه حل i تحت معیارj برای بازیکنq است در حالی که q=1,2,….,k، i =1,2,3…,m و j=1,2,…, n_q.

رابطه (10) نشان می دهد مسئله چند تصمیم‌گیرنده و چند معیار ضرورتاً به صورت یک مسئله تحلیل تصمیم چند معیاره با یک تصمیم گیرنده و l معیارو یا چند تصمیم گیرنده که هر تصمیم‌گیرنده تنها یک معیارداشته باشد، حل می شود (16).

تصمیم‌گیری چند معیاره: بازی استراتژیک

جهت دستیابی به راه حلی معتبر مسئله چندتصمیم‌گیرنده و چند معیار را می‌توان به صورت یک بازی استراتژیک مدل‌سازی و مطالعه کرد. این تئوری با استفاده از رتبه‌بندی ترتیبی به جای عملکرد سنتی یا نفع تصمیم‌گیرنده امکان تحلیل را فراهم می‌نماید. بدین ترتیب ماتریس‌های زیر جایگزین ماتریس‌های (8) و (9) می‌گردد:

$$MCDM_{ord}=\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ . & . & \dots & . \\ . & . & \dots & . \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mn} \end{bmatrix}_{m\times n} \quad (11)$$

و ماتریس (10) به ماتریس (12) تبدیل می شود:

$$MCDM_{card}=\begin{bmatrix} R_{111}R_{121}\dots R_{1n1}R_{112}R_{122}\dots R_{1n2}\dots R_{11k}R_{12k}\dots R_{1nk} \\ R_{211}R_{221}\dots R_{2n1}R_{212}R_{222}\dots R_{2n2}\dots R_{21k}R_{22k}\dots R_{2nk} \\ . \ . \ \dots \ . \ . \ . \ \dots \ . \ \dots \ . \ . \ \dots \ . \\ . \ . \ \dots \ . \ . \ . \ \dots \ . \ \dots \ . \ . \ \dots \ . \\ . \ . \ \dots \ . \ . \ . \ \dots \ . \ \dots \ . \ . \ \dots \ . \\ R_{m11}R_{m21}\dots R_{mn1}R_{m11}R_{m21}\dots R_{mn1}\dots R_{m1k}R_{m2k}\dots R_{mnk} \end{bmatrix}_{ml} \quad (12)$$

در این جا R_{ij} رتبه بندی راه حل iبا توجه به معیارj است و R_{ijq} رتبه بندی راه حلiنسبت به معیارj به نظر بازیکن q است.

به دست آوردن رتبه‌بندی ترتیبی راه حل‌های تصمیم‌گیرندگان نسبت به اطلاعات اصلی مشکلات کمتری را به همراه دارد. زمانی که تحلیل مبتنی بر اطلاعات ترتیبی باشد و رتبه بندی‌ها تغییر نکنند، نتایج پایانی نسبت به عدم قطعیت در تغییرات عملکرد یا منافع، حساس نیستند. مزیت دیگر مطالعه یک مسئله تحلیل تصمیم چندمعیاره به شکل یکبازی استراتژیک عدم نیاز به وزن دهی به تصمیم‌گیرندگان و معیارها است چرا که خود همین امر نیز موجب کاهش عدم قطعیت نتایج می‌شود. از طرفی چون تکنیک‌های تحلیل تصمیم چندمعیاره مرسوم صرفاً روی تصمیمات گروه تمرکز دارند، یک راه حل عبارت از یک نتیجه مشارکتی است. این تکنیک‌ها همکاری کاملی را در میان گروهها فرض می‌نمایند. در مقابل و در حالت غیرمشارکتی،تصمیم‌گیرندگان توافقی ندارند و نتایج با فرض عدم همکاری کامل بین اعضا به دست می‌آیند (16). برای یافتن نتایج احتمالی بازی، تحلیل پایداری برای تمامی نتایج ممکن بازی با استفاده از تعریف تعادلی نش انجام می‌شود.

تئوری چانه‌زنی نش

طبق الگوی تعادلی نش، حالت s برای بازیکن i یک پایداری نش است، اگر و تنها اگر بازیکن i هیچ سود یک جانبه‌ای با خروج از

وضعیت S بدست نیاورد (مجموعه سود یک‌جانبه تصمیم‌گیرنده i با خروج از وضعیت S، مجموعه‌ای تهی $R_i^+(s)=\phi$ باشد) (16).

نتایج و بحث

با استفاده از فرمولاسیون پیشنهادی در مدل بهینه‌سازی، تعدادی استراتژی اولیه حاوی درصد تصفیه مشخص برای هر یک از تخلیه‌کنندگان و مقدار BOD حاصل در نقطه کنترل و مجموع هزینه و جریمه متناظر با آن به دست آمد. برای بررسی هرچه بیشتر، سه استراتژی نهایی از جواب‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد، به صورتی که دامنه پاسخ‌ها را به طور کامل در بر گرفته باشد و دو استراتژی مرزی عبارتند از، استراتژی A، وضعیت کنونی مناقشه (درصد تصفیه تمامی منابع آلاینده برابر با صفر و BOD در نقطه کنترل برابر با 26/59 میلی‌گرم در لیتر) و استراتژی E، وضعیتی که تمامی منابع 95 درصد از BOD خروجی را تصفیه نمایند (درصد تصفیه 95 و BOD نقطه کنترل 4/05 میلی‌گرم در لیتر) است. بدین صورت پنج پاسخ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مقادیر هر عملکرد و راه حل در جدول 3 مشاهده می‌گردد. سیاست‌های تصفیه برگزیده شده در جدول 4 ارائه شده‌اند. این مسئله چند تصمیم‌گیرنده و چند معیار را می‌توان به پنج راه حل و دو تصمیم‌گیرنده (کارشناسان محیط‌زیست که نگران حفظ کیفیت آب در رودخانه و دریا هستند و تخلیه‌کنندگان بار آلودگی که نگران افزایش هزینه‌های ناشی از تصفیه فاضلاب خروجی و جریمه ناشی از عدم تصفیه هستند) خلاصه نمود. بهترین راه حل کمترین میزان BOD و پایین‌ترین هزینه است.

جدول 3- عملکرد راه‌حل‌های حفظ کیفیت رودخانه در نقطه تلاقی با دریا تحت دو معیار

Table 3- Performances of solutions to control the quality of the river in the intersection of the river and sea considering two criteria

استراتژی Strategy	مقدار BOD در مصب (میلی‌گرم بر لیتر) BOD concentration in estuary (mg/l)	مقدار هزینه تصفیه تخلیه‌کنندگان(دلار در سال) Treatment cost ($/year)
A	26.59	693,282
B	20.95	545,971
C	11.01	341,197
D	6.16	296,293
E	4.05	390,770

جدول 4- سیاست‌های تصفیه واحدهای تخلیه‌کننده بار آلودگی به ازای استراتژیهای مختلف

Table 4- Dischargers' waste treatment policies for different strategies

تخلیه‌کننده Discharger	درصد تصفیه تخلیه‌کننده‌ها Treatment percentage				
	استراتژی A Strategy A	استراتژی B Strategy B	استراتژی C Strategy C	استراتژی D Strategy D	استراتژی E Strategy E
1	0	0.79	0.84	0.84	0.95
2	0	0.2	0.32	0.38	0.95
3	0	0.3	0.34	0.44	0.95
4	0	0.26	0.33	0.41	0.95
5	0	0.29	0.31	0.34	0.95
6	0	0.29	0.24	0.33	0.95
7	0	0.95	0.95	0.95	0.95
8	0	0.73	0.81	0.87	0.95
9	0	0.2	0.2	0.2	0.95
10	0	0.32	0.48	0.54	0.95
11	0	0.38	0.38	0.46	0.95
12	0	0.2	0.29	0.43	0.95
13	0	0.2	0.7	0.95	0.95
14	0	0.73	0.81	0.8	0.95
15	0	0.2	0.2	0.2	0.95

برای تعریف مسئله به فرم ماتریسی، به مقادیر عملکرد نیاز است. سپس مسئله را می‌توان به فرم ماتریسی تبدیل کرد:

$$MCDM_{card} = \begin{bmatrix} 26.95 & 693,282 \\ 20,95 & 545,971 \\ 11.01 & 341,197 \\ 6.16 & 296,293 \\ 4.05 & 390,770 \end{bmatrix}_{4\times 2} \quad (13)$$

و به فرم صحیح (14) تبدیل می‌شود:

$$MCDM_{ord} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \\ 3 & 4 \\ 4 & 5 \\ 5 & 3 \end{bmatrix}_{4\times 2} \quad (14)$$

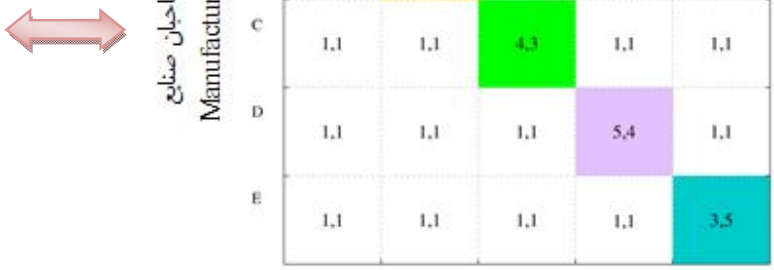
اعداد ستون‌های چپ و راست در ماتریس (13) به ترتیب نشان‌دهنده مقدار BOD در نقطه کنترلی و مقدار هزینه تصفیه (متوسط عملکرد راه‌حل‌ها تحت معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی) طبق جدول 3 هستند. در فرم ماتریسی صحیح (ماتریس 14)، اعداد نشان‌دهنده رتبه استراتژی‌های اول تا پنجم از نقطه نظر تصمیم‌گیرنده نظیر خود (با توجه به معیار ستون متناظر) می‌باشند. رتبه‌های بالاتر تحت همان معیار برای تصمیم‌گیرنده اولویت دارند. برای حل این مسئله تحلیل تصمیم چند معیاره از طریق تئوری بازی‌های غیرهمکارانه، یک ماتریس انتقال باید ایجاد گردد تا در بردارنده تمامی ترکیبات ممکن راه حل‌ها باشد. با وجود دو تصمیم‌گیرنده و پنج راه حل برای هر یک از آنها، ماتریس انتقال دارای $5^2 = 25$ ردیف است. در مسئله حاضر، شرایط تصفیه و مقدار BOD تغییر نمی‌کند مگر اینکه هر دو گروه ذینفع بر سر روش جدیدی توافق داشته باشند. بدین ترتیب نتایجی که در آنها دو تصمیم‌گیرنده راه حل‌های متفاوتی را انتخاب می‌نمایند تغییری در وضعیت موجود ایجاد نمی‌نمایند. بنابراین، این مغایرت‌ها (نتایج غیرهمکارانه) در وضعیت موجود دارای یک رتبه هستند. بر اساس این بحث، ماتریس انتقال و بازی نظیر را می توان در قالب تئوری چانه‌زنی نش و به صورت نشان داده شده در شکل 3 توسعه داد. چهار سلول نشان داده شده در ماتریس سمت راست بیانگر نتایج همکارانه ممکن هستند که زمانی رخ می دهند که هر دو تصمیم گیرنده یک استراتژی متفاوت از راه حل معمول کنونی (A) را انتخاب نمایند. تحت تمامی نتایج دیگر، منافع با منافع وضعیت حاضر یکسان هستند چرا که وضعیت نسبت به وضعیت حاضر تغییر نمی‌نماید مگر این که هر دو گروه استراتژی یکسانی جز A را در آن واحد انتخاب نمایند. با این وجود به گروه‌ها اجازه داده می شود استراتژی‌های مستقلی را انتخاب نمایند که با هم تطابق ندارند. بنابراین، استراتژی‌های B، C، D و E نتایج همکارانه محتمل هستند و با توجه به اینکه هر دو تصمیم‌گیرنده در هر چهار وضعیت در وضعیت پایدار هستند، وضعیت‌های ذکر شده، نقاط تعادلی نش بازی و بنابراین جواب‌های محتمل بازی می‌باشند، در صورتی که بازیکن‌ها بر اساس الگوی نش رفتار کنند.

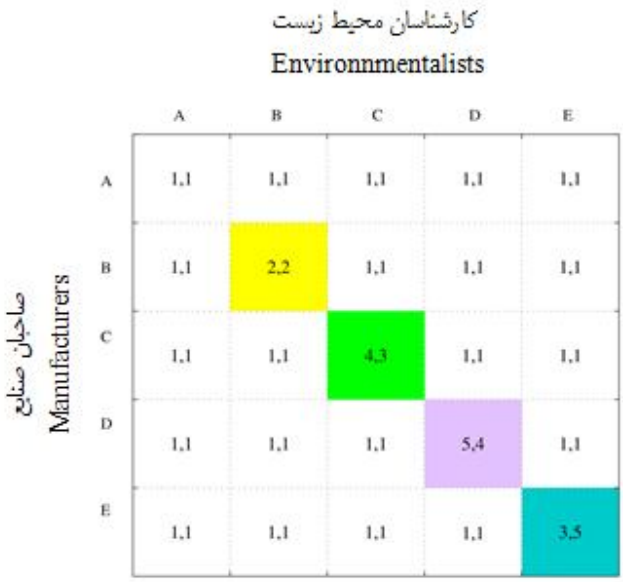
نتیجه‌گیری کلی

مدل تلفیقی رفع اختلاف و تخصیص بارآلودگی که در این تحقیق برای حل مسائل مدیریت کیفی رودخانه ها پیشنهاد شده است از چند قسمت تشکیل می‌شود. در ابتدا پس از جمع‌آوری اطلاعات هیدرولیکی و کیفی رودخانه و فاضلاب‌های ورودی به رودخانه و صحت سنجی این اطلاعات، از آن‌ها برای شبیه سازی شرایط کیفی رودخانه استفاده می شود. این مدل شبیه سازی کیفی با مدل MOPSO تلفیق می شود و با تعیین اهداف و مطلوبیت‌های گروههای تصمیم‌گیرندگان و ذینفعان، بهینه‌ترین پاسخ‌ها با در نظر گرفتن مطلوبیت ذینفعان به دست می‌آید. اهداف در نظر گرفته شده در این تحقیق حداقل کردن هزینه تصفیه تخلیه کنندگان و حداقل کردن مقدار تخطی BOD از استاندارد می باشند. در مرحله بعد، ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری چند معیاره تشکیل می‌شود. با ایجاد ماتریس انتقال، مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره به تئوری بازی‌ها تبدیل می‌گردد. در نهایت به کمک تعریف تعادلینش، درصد تصفیه بهینه مربوط به هر تخلیه‌کننده، با توجه به معیارکاهش هزینه تصفیه و مقدار تخطی متناظر آن مشخص می‌شود. بنابراین، استراتژی‌های B، C، D و E بیان شده در جدول (3)، راه‌حل‌های پایدار مناقشه موجود در تعادل نش می‌باشند و با توجه به این‌که هر دو تصمیم‌گیرنده در هر چهار وضعیت در وضعیت پایدار هستند، وضعیت‌های ذکر شده، نقاط تعادلی نش بازی ولذا جواب‌های محتمل بازی اگر بازیکن‌ها بر اساس الگوی نش رفتار کنند، می‌باشند.

کارایی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از اطلاعات کمی و کیفی رودخانه سفیدرود واقع در استان گیلان ارزیابی شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده کاربردی بودن و کارایی مناسب مدل‌های پیشنهادی برای تخصیص بارآلودگی در مدیریت کیفیت آب در سیستم‌های رودخانه‌ای است.

$$MCDM_{trans\ ord} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 2 & 2 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 4 & 3 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 5 & 4 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 3 & 5 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}_{25\times 2}$$





شکل 3- ماتریس انتقالی (سمت چپ) و ساختار بازی نظیر (سمت راست)

Figure 3- Transition matrix (left side) and game structure (right side)

منابع

1- Abrishamchi A., Danesh-Yazdi M., and Tajrishy M. 2011. Conflict Resolution of water resources allocations using Game Theoretic approach: The case of Orumieh River Basin in Iran. AWRA 2011 summer specially conference, Utah, USA.

2- Akbari N. 2012. Quantitative and Qualitative Management of the River System using Conflict Resolution Approach. Master Thesis, Environment Faculty, University of Tehran, Iran (in Persian).

3- Alikhan A., Rubia Z., Tyagi V.K., Anwar K., and Lew B. 2011. Sustainable Options of Post Trestment of USAB effluent Treating Sewage: A review. Resources, Conservation and Recycling, 55: 1232-1251.

4- Azadnia A., Zahraei, B. 2009. The Calibration of Non-linear Muskingum Method using Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO). The Eighth International River Engineering Proceeding, 8-10 Juli 2009, Ahvaz, Iran (in Persian).

5- Azimi M., Ghavasiye A., Hashemi H., Barkatein S., Jafarigol F. 2010. Evaluation of River Self-Purfication Capacity using Qualitative Simulation, Case Study: The Sefidrud River.Natinal Water Conference (in Persian with English Abstract).

6- Environmental Protection Agency. 2010. Technical Report of the Prevention, Control and Reduce of the Pollution of TheSefidrud River (in Persian).

7- Environmental Protection Agency, Department of Marine Environemnt. 2012. Identification of National Standards and Prevention of Environmental Pollution in The Caspian Sea (in Persian).

8- FallahMehdipoor A. and Bozorg Haddad A. 2012. Optimization of Utilisation of Multi PurposeReserviours using Multi Objective Particle Swarm Optimization, Water and Waste Journal, 97-105:84 (in Persian).

9- Ganji A., Khalili D., and Karamouz M. 2007. Development of stochastic dynamic Nash game model for reservoir operation. I. The symmetric stochastic model with perfect information. Advances in Water Resources, 30: 528–542.

10- Hosseinzade H., Afshar A., Sharifi F. 2010. Optimization of Waste Load Allocation using Ant Colony Optimization Algorithem, Water Resource Research Journal, 1-13:17 (in Persian).
11- Jamshidi S., BadaliansGholikandi G., and Ahmadiar A. 2013. An Assessment of Using Water Quality Trading to Improve Water Quality Management. 3rd International Conference on Environmental Management and Planning, Tehran, Iran.
12- Kassab G., Halalsheh M., Klapwijk A., Fayyad M., and Vanlier J.B. 2010. Sequential Anaerobic Treatment for Domestic Wastewater-A review. Bioresource Technology, 101: 3299-3310.
13- Kerachian R., and Karamouz M. 2006. Optimal Reservoir Operation considering the Water Quality Issues: A Stochastic Conflict Resolution Approach. Water Resources Research, 42: 1-17.
14- Kerachian R., and Karamouz M. 2007. A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-river systems. Advances in Water Resources, 30: 866-882.
15- Madani K. 2010. Game theory and Water Resources. Journal of Hydrology, 381: 225_238.
16- Madani K., and Lund J.R. 2011. A Mont-Carlo game theoretic approach for Multi-Criteria Decision Making under uncertainty. Advances in Water Resources, 34: 607-616.
17- Malekpoorstalki S. 2010. Obtaining River Water Quality Management Policies using the Evolutionary Game Theories, Master Thesis, Civil Engineering Faculty, University of Tehran (in Persian).
18- Nash J.F. 1953. Two-person cooperative game. Econometria, 21: 128-140.
19- Niksokhan M.H., Kerachian R., and Amin P. 2009. A Stochastic Conflict Resolution Model for Trading Pollutant Discharge Permits in River Systems. Environmental Monitoring and Assessment, 154: 219-232.
20- Qods Consulting engineering company, 2012. Environmental studies report on great basin of the Sefidrud (in Persian).
21- U.S. Environmental Protection Agency. 2004. Biological Nutrient Removal and Costs. Office of Wastewater Management, Municipal Support Division, Municipal Technology Branch.
22- U.S. Environmental Protection Agency. 2008. Municipal Nutrient Removal Technologies Reference Document", Office of Wastewater Management, Municipal Support Division, Municipal Technology Branch.

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 1, Mar.-Apr. 2016, p. 88-98

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 30، شماره 1، فروردین –اردیبهشت 1395، ص. 98-88

Optimal Waste Load Allocation Using Multi-Objective Optimization and Multi-Criteria Decision Analysis

L. Saberi[1]- M.H. Niksokhan[2]*- A. Sarang[3]

Received:27-07-2014
Accepted:06-04-2015

Introduction: Increasing demand for water, depletion of resources of acceptable quality, and excessive water pollution due to agricultural and industrial developments has caused intensive social and environmental problems all over the world. Given the environmental importance of rivers, complexity and extent of pollution factors and physical, chemical and biological processes in these systems, optimal waste-load allocation in river systems has been given considerable attention in the literature in the past decades. The overall objective of planning and quality management of river systems is to develop and implement a coordinated set of strategies and policies to reduce or allocate of pollution entering the rivers so that the water quality matches by proposing environmental standards with an acceptable reliability. In such matters, often there are several different decision makers with different utilities which lead to conflicts.

Methods/Materials: In this research, a conflict resolution framework for optimal waste load allocation in river systems is proposed, considering the total treatment cost and the Biological Oxygen Demand (BOD) violation characteristics. There are two decision-makers inclusive waste load discharges coalition and environmentalists who have conflicting objectives. This framework consists of an embedded river water quality simulator, which simulates the transport process including reaction kinetics. The trade-off curve between objectives is obtained using the Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm which these objectives are minimization of the total cost of treatment and penalties that must be paid by discharges and a violation of water quality standards considering BOD parameter which is controlled by environmentalists. Thus, the basic policy of river's water quality management is formulated in such a way that the decision-makers are ensured their benefits will be provided as far as possible. By using MOPSO, five alternatives and their performances under criteria are found. Values that are calculated by MOPSO are applied to form the cardinal Multi-Criteria Decision Making (MCDM) matrix. Afterwards, the cardinal MCDM matrix is transformed into the ordinal form. For studying competitive behaviors in such situations, a mathematical tool called game theory is used. Hence the transition matrix is formed for solving the problem by game theory and qualitative data. Finally the best non-dominated solution is defined using the Nash conflict resolution theory .

Results and Discussion: The interaction point of the Sefidrood River and Caspian Sea is considered as a checkpoint and the standard amount of BOD considering the Iranian Protection Agency's standards is equivalent to 5 mg/l. In the studied area, none of waste load dischargers perform current wastewater treatment. Under this circumstance, the BOD has the value of 26.59 mg/l which violated its standard amount. By MOPSO algorithm and Nash theory five alternatives, which each of them includes both the amount of BOD in checkpoint and treatment and penalty total cost, are obtained for two decision makers. The best and final alternative, that is preferred by both of decision-makers, reduces the BOD amount and the total payable cost to 6.16 mg/l and 296,293 $/year respectively.

Conclusion: The practical utility of the proposed model in decision-making is illustrated through a realistic example of the Sefidrood River in the northern part of Iran. As a final alternative, that suggests the most economical measurement by minimizing of treatment and penalty total cost, there are acceptable percentage of treatment per discharge and the violation of standard for BOD parameter is negligible.

Keywords: MOPSO Algorithm, Nash Bargaining Theory, Waste Load Allocation

1-MSc., Graduate Faculty of Environment, University of Tehran
2, 3-Assistant Professors, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran
(*-Corresponding Author Email: niksokhan@ut.ac.ir)